

**Artigo N° A023658**

## **AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE MISTURAS BETUMINOSAS RECICLADAS COM ELEVADAS TAXAS DE MATERIAL FRESADO**

**Daniela Palha<sup>1(\*)</sup>, Paulo Fonseca<sup>1</sup>, Carla Guimarães<sup>1</sup>, Liliana Abreu<sup>2</sup>, Hugo Silva<sup>2</sup>, Joel Oliveira<sup>2</sup>, Paulo Pereira<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Elevogroup, MonteAdriano Engenharia e Construção, SA – Porto, Portugal

<sup>2</sup> Universidade do Minho, Centro do Território Ambiente e Construção (UM/C-TAC) – Guimarães, Portugal

(\*) Email: [daniela.palha@elevogroup.com](mailto:daniela.palha@elevogroup.com)

### **RESUMO**

*Atualmente, e com o desenvolvimento constante da sociedade, o aumento excessivo da utilização dos recursos naturais têm-se tornado um tema de grande preocupação. Nesse sentido, a reutilização dos materiais existentes é uma solução viável que se tem tornado cada vez mais comum. No que respeita à indústria da construção, nomeadamente à indústria de pavimentação, a reciclagem de materiais é uma questão que assume uma importância ainda mais relevante, pois a reutilização do material fresado (MF) dos pavimentos permite a redução de custos e do impacto ambiental das atividades de pavimentação. Contudo, a incorporação de MF na produção de novas misturas pode causar alguns problemas devido às características do betume envelhecido presente no MF, sendo o uso de aditivos rejuvenescedores uma forma de contornar este problema. Neste estudo foram estudados três rejuvenescedores e dois ligantes diferentes, tendo-se concluído que os rejuvenescedores testados apresentam resultados semelhantes em termos de modificação das misturas.*

**Palavras-chave:** Reciclagem, Mistura betuminosa, Rejuvenescedor, Material Fresado.

### **1. INTRODUÇÃO**

A importância que os pavimentos rodoviários assumem no papel da sociedade hoje em dia leva a que a manutenção e a reabilitação destes seja um fator cada vez mais relevante. Das várias soluções de reabilitação utilizadas atualmente, a reciclagem é uma das técnicas mais utilizadas, sendo que o uso de material fresado se tem tornado uma prática cada vez mais comum (Dinis-Almeida et al., 2012).

Das várias vantagens que este método apresenta, enumeram-se algumas como sendo mais relevantes, nomeadamente a utilização de menores quantidades de recursos naturais e a diminuição do impacto ambiental, através da redução da emissão de gases poluentes para a atmosfera. Segundo Kerkhof (2012), a redução no consumo de energia de produção de uma mistura betuminosa reciclada com 50% de material fresado (MF) é de 14%, correspondendo a uma redução de emissões de CO<sub>2</sub> de 11%.

Relativamente à reciclagem de pavimentos, as técnicas a quente são normalmente apontadas com as melhores alternativas em termos de desempenho, sendo que a incorporação de altas percentagens de material fresado está presente em grande parte dos estudos efetuados (Silva et al., 2012; Shu et al., 2012).

Contudo, e apesar de a reciclagem ser uma técnica que apresenta inúmeras vantagens, existem algumas desvantagens que lhe são igualmente associadas, como o facto de o MF ser um material heterogéneo e ter presente na sua constituição betume que se encontra envelhecido, o

que requer um tratamento mais cuidado deste material (Colbert e You, 2012; Oliveira et al., 2012). Este tratamento pode passar pela adição de um betume com um grau de penetração mais elevado ou utilização de aditivos com função rejuvenescedora, sejam estes químicos ou orgânicos (Silva *et al.*, 2010). Os aditivos rejuvenescedores são produtos com a capacidade de restaurar a parte dos maltenos existente no betume, perdidos durante o tempo de vida útil do pavimento por oxidação (Brownridge, 2010). Estudos efetuados nos EUA mostram que a utilização de rejuvenescedores nas camadas superficiais do pavimento permite o prolongamento da vida útil dos mesmos (Boyer, 2012).

A escolha do tipo de rejuvenescedor a ser utilizado depende da rigidez do ligante envelhecido presente no MF (Castro, 2003). Além de melhorar as características do ligante envelhecido, o uso de aditivos rejuvenescedores, em especial nas misturas betuminosas com incorporação de elevadas quantidades de MF, conduzem a misturas recicladas com maior durabilidade, favorecem o envolvimento dos agregados pelo novo betume e permitem que a mistura final cumpra mais facilmente as especificações (Baptista, 2006).

Este trabalho tem como objetivo apresentar os resultados de um estudo realizado para selecionar as melhores condições para produzir misturas recicladas com incorporação de 50% de material fresado, a fim de se obter uma mistura betuminosa reciclada com uma qualidade equivalente à de uma mistura convencional. O estudo inclui a avaliação da eficácia dos aditivos rejuvenescedores utilizados na regeneração de betume, o estudo das temperaturas de mistura e, essencialmente, a determinação do desempenho da mistura resultante avaliado através de ensaios de laboratório.

## **2. ENQUADRAMENTO GLOBAL DO TRABALHO**

### **2.1 Projeto QREN para produção de misturas recicladas e temperadas**

A realização deste trabalho enquadra-se num projeto QREN mais abrangente, que tem a denominação “Eficiência Energética e Ambiental das Misturas Betuminosas e Redução das Emissões de Gases de Efeito Estufa” e foca-se em duas vertentes principais:

- Desenvolver misturas betuminosas com incorporação de uma taxa elevada de MF (até 50% da composição da mistura reciclada final);
- Desenvolver misturas betuminosas recicladas temperadas, através de uma metodologia que permita a redução da temperatura de produção das misturas, neste caso através da metodologia do betume espuma.

Durante o projeto devem determinar-se quais as condições ideais em que devem ser produzidas estas misturas recicladas para possuírem um desempenho mecânico idêntico ao de uma mistura betuminosa convencional.

Através da realização deste projeto QREN pretende dar-se resposta à necessidade das empresas melhorarem os processos de produção de misturas betuminosas, o que permitirá desenvolver novas capacidades e torná-las mais competitivas, nomeadamente no que respeita à produção de misturas recicladas inovadoras, mais sustentáveis em termos económicos e ambientais, sem prejudicarem a durabilidade do pavimento onde serão aplicadas. Os resultados a atingir com as misturas estudadas neste projeto podem e devem ser utilizados como exemplo de empreendedorismo e inovação a nível nacional e internacional, o que permitirá aceder a novos mercados mais competitivos.

## 2.2 Central betuminosa para a produção de misturas betuminosas com altas taxas de reciclagem

A utilização de elevadas taxas de material reciclado obriga a utilizar centrais de produção com algumas alterações relativamente às que são utilizadas na produção de misturas betuminosas convencionais. No âmbito do projeto QREN acima referido foi adquirida uma nova central (Figura 1), que se diferencia das restantes centrais betuminosas descontínuas nas seguintes componentes:

- Anel especial para introdução de material fresado no interior do tambor secador;
- Linha de introdução de material fresado até ao misturador incluindo tolva de pesagem;
- Linha de introdução de fresados no anel do tambor secador com dosagem volumétrica;
- Sistema de betume espuma à entrada do misturador;
- Sistema automático para a introdução de fibras com dosagem ponderal;
- Sistema automático para a introdução de líquidos com dosagem volumétrica.



Figura 1. Central de produção adquirida no âmbito do projeto QREN referido

A obtenção de taxas de reciclagem tão elevadas (50%) nesta central será conseguida com base na separação do material fresado e a sua introdução em diferentes fases do processo produtivo, de modo a melhorar a taxa de produção e a reduzir o envelhecimento do betume (existente essencialmente na fração fina do MF).

Num estudo anterior realizado por Fonseca et al. (2013) estudou-se a forma de separar o MF segundo dois processos, um processo manual e um mecânico, assim como as características resultantes dos materiais obtidos em cada uma das frações em que o fresado foi separado. Com base nesse artigo, considerou-se que neste trabalho a separação do MF devia ser feita segundo o processo mecânico, com recurso a um crivo industrial (Figura 2) onde se obtêm duas frações de MF: 0/6 mm e 6/12 mm. A fração mais pequena é introduzida no misturador da central a frio, e a fração mais grossa é introduzida no final do tambor secador.



Figura 2. Separador mecânico utilizado para a separação do MF

No entanto, para se conseguir obter misturas com taxas de reciclagem tão elevadas poderá ser necessário recorrer à utilização de aditivos rejuvenescedores e de tecnologias temperadas, para garantir um envolvimento adequado dos agregados a menores temperaturas, reduzindo ao mesmo tempo o envelhecimento do betume, o consumo de energia e a produção de gases com efeitos de estufa (tecnologias possíveis de utilizar nesta central betuminosa). Assim, neste estudo serão apresentados os resultados da caracterização de misturas recicladas com incorporação de 50% de MF com e sem aditivos rejuvenescedores.

### **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

#### **3.1. Materiais**

##### **3.1.1 Material Fresado (MF)**

O MF utilizado neste estudo é resultante da fresagem da camada superficial de um pavimento de uma autoestrada, que foi armazenada no mesmo local onde se encontra a central de produção acima referida. Este MF resulta da fresagem de apenas uma camada do pavimento, de modo a garantir uma maior homogeneidade do mesmo, contribuindo assim para um melhor controlo na produção das misturas betuminosas recicladas.

##### **3.1.2 Aditivos rejuvenescedores**

Neste estudo foram utilizados três aditivos rejuvenescedores diferentes. O rejuvenescedor 1 é um óleo de origem vegetal, o rejuvenescedor 2 é um produto comercial descrito pelos fabricantes como antioxidante, plastificante, rejuvenescedor, hidratante, diluente e dispersante e o rejuvenescedor 3 é um aditivo comercial novo no mercado.

##### **3.1.3 Agregados e betume novo**

Os agregados novos utilizados neste estudo são essencialmente de origem granítica, à exceção do filer comercial que é de origem calcária.

Relativamente ao betume novo, será utilizado um betume com um grau de penetração 70/100 de modo a permitir conseguir obter uma flexibilidade adicional que foi perdida, em grande parte, pelo betume mais duro presente no MF.

#### **3.2. Métodos**

##### **3.2.1 Formulação da mistura betuminosa reciclada com 50% de MF**

Neste estudo optou-se por incorporar 50% de MF, em que 30% é material fino (fração 0/6) e 20% é material grosso (fração 6/12), sendo inicialmente necessário, num estudo efetuado por Fonseca et al. (2013), determinar a percentagem de betume presente em cada uma das frações com vista à obtenção da quantidade de betume novo a adicionar na mistura final. Para esta mistura, os novos agregados e a fração grossa do MF foram aquecidos a 230 °C, o betume novo foi aquecido a 150 °C e a fração fina do MF foi introduzida a frio (temperatura ambiente). De forma a garantir uma trabalhabilidade adequada da mistura, os agregados novos foram colocados no misturador, juntamente com o betume novo e as duas frações do MF, sendo que o tempo de mistura foi o necessário para que os agregados ficassem totalmente envolvidos pelo betume e a mistura ficasse totalmente homogénea.

No que respeita à formulação da mistura AC14 surf/bin reciclada com 50% de MF, tendo em vista a determinação da percentagem ótima de betume final a utilizar, recorreu-se ao método

de Marshall. Assim, foram estudadas cinco percentagens de betume distintas de 4% a 5% de betume com intervalos de 0,5%. Para cada percentagem de betume foram compactados seis provetes com 75 pancadas em cada face (EN 12697-30) e foi determinada a baridade aparente de cada um e a baridade máxima teórica das misturas com as diferentes percentagens de betume. Com base nestes resultados foi possível obter as características volumétricas de cada mistura, ou seja, o volume de vazios da mistura (Vv) e o volume de vazios no esqueleto do agregado (VMA). Posteriormente todos os provetes foram sujeitos ao ensaio de Marshall, segundo a norma EN 12697-34, registando-se o máximo valor da estabilidade e a deformação sofrida por cada provete. De acordo com as recomendações do Anexo Nacional da norma EN 13108-1, a percentagem ótima de betume é definida com base no valor máximo da estabilidade, volume de vazios igual a 4% (para a mistura AC14 surf/bin) e a máxima baridade aparente.

### **3.2.2 Processo de aditivação do betume**

Uma vez que o objetivo deste estudo é obter uma mistura betuminosa reciclada que possua um desempenho mecânico idêntico ao de uma mistura betuminosa convencional, considerou-se que o ligante final da mistura reciclada deveria ter características idênticas ao betume 35/50 (usado geralmente nas misturas convencionais em Portugal). Nesse sentido, num estudo anterior (Abreu et al., 2013) definiu-se que a percentagem de aditivo rejuvenescedor a adicionar ao betume novo (70/100) seria 3% (do betume total), de modo a tornar o ligante final com características próximas do betume 35/50.

O processo de aditivação consistiu em adicionar 3% de cada aditivo ao betume 70/100 antes de serem misturados com os restantes materiais (agregados novos e MF). O betume 70/100 foi aquecido a 150 °C e quando a temperatura se encontrava estabilizada, foi adicionado o aditivo, tentando manter-se constante a temperatura de mistura a 150 °C, durante 10 min a 400 rpm.

### **3.2.3 Sensibilidade à água das misturas recicladas**

Para o ensaio de sensibilidade à água é necessária a preparação de dois grupos de provetes, que antes de serem submetidos ao ensaio são acondicionados em ambientes diferentes. Destes dois grupos de amostras, um dele é mantido a seco à temperatura ambiente  $20 \pm 5$  °C, de acordo com a norma EN 12697-23, enquanto o outro grupo é imerso em água a  $40 \pm 1$  °C durante um período de 68 a 72 h. Após esse período nas condições descritas, a temperatura da água onde se encontra um grupo de provetes é reduzida para uma temperatura compreendida entre 5 e 25 °C, e os provetes ficam imersos mais 2 horas, enquanto os provetes secos são igualmente colocados a uma temperatura entre 5 e 25 °C ao ar, tal como especificado EN 12697-12. Após o tempo total de imersão, todos os provetes são ensaiados à tração indireta. Após realizar o ensaio a todos os provetes, e dividindo os valores médios de resistência do provetes imersos pelos dos provetes secos, é possível calcular a resistência conservada em tração indireta ( $ITS_R$ ), que permite ter uma perceção do quanto a mistura em estudo é sensível à água.

### **3.2.4 Resistência à deformação permanente das misturas recicladas**

A resistência à deformação permanente no ensaio de pista foi obtida com recurso ao equipamento *Wheel Tracking Test* (WTT), cujos parâmetros de ensaio são definidos pela norma EN 12697-22: temperatura de ensaio 60 °C, carga 70 N, frequência de ensaio 0,44 Hz e aplicação de 10000 ciclos de carga.

### 3.2.5 Módulo e resistência à fadiga das misturas recicladas

De modo a conhecer o módulo de rigidez das misturas recicladas com e sem aditivo rejuvenescedor, foram ensaiadas 9 vigas de cada mistura a 20 °C, sendo esta temperatura representativa de vários locais de Portugal, segundo a norma EN 13108-20. Além destes ensaios realizados a todas as vigas, três vigas foram ensaiadas às temperaturas de 0, 10, 20 e 30 °C. Em cada ensaio é realizado um varrimento de frequências (entre 0,1 e 10 Hz) de acordo com a norma EN 12697-26. O ensaio de módulo é não destrutivo, sendo normalmente sucedido pela realização do ensaio de fadiga às mesmas vigas.

O ensaio de resistência à fadiga tem como objetivo verificar ao fim de quantos ciclos a mistura atinge a ruína. Neste caso, a ruína é definida pelo número de ciclos correspondente a um valor de módulo de rigidez da viga igual a metade do valor inicial, uma vez que o ensaio é realizado em extensão controlada. Com a realização do ensaio a vários provetes, para diferentes níveis de extensão, é possível determinar a lei de fadiga do material. Para o ensaio de fadiga foram ensaiadas 9 vigas de cada mistura, seguindo-se o procedimento de ensaio da norma EN 12697-24. A temperatura de ensaio foi de 20 °C e a frequência de aplicação da carga aos provetes foi de 10 Hz.

## 4. ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

### 4.1 Formulação da mistura betuminosa reciclada

A formulação da mistura reciclada com 50% de material fresado foi feita recorrendo ao método de Marshall, tal como foi referido anteriormente. A Tabela 1 mostra as percentagens dos materiais constituintes da mistura para cada percentagem de betume.

Tabela 1. Materiais constituintes da mistura betuminosa reciclada com 50% de MF

Percentagem de Betume		RAP		A. 8/14	A. 4/10	A. 0/4	Filer C.
Total	Novo	Fino (%)	Grosso (%)	(%)	(%)	(%)	(%)
4,0%	1,4%			34,7%	5,3%	4,9%	1,0%
4,5%	1,9%			37,1%	5,3%	4,7%	1,0%
5,0%	2,4%	30,0%	20,0%	36,9%	5,2%	4,6%	1,0%
5,5%	2,9%			36,5%	5,2%	4,5%	0,9%
6,0%	3,4%			36,2%	5,2%	4,3%	0,9%

Com base na constituição da mistura para cada percentagem de betume, os resultados da formulação estão representados na Tabela 2 e levam a concluir que a percentagem ótima de betume é 5,1% (2,5% de betume novo), cujas características estão representadas na Tabela 3.

Tabela 2. Resumo dos resultados da formulação de Marshall

Percentagem de Betume [%]	BMT [kg/m <sup>3</sup> ]	Baridade Aparente [kg/m <sup>3</sup> ]	Volume de Vazios [%]	VMA [%]	Estabilidade [kN]	Deformação [mm]
4,00	2489,00	2338,00	6,10	15,10	17,20	2,50
4,50	2477,00	2351,00	5,10	15,30	18,50	2,90
5,00	2459,00	2361,00	4,00	15,30	19,90	3,40
5,50	2441,00	2366,00	3,10	15,60	18,90	4,00
6,00	2419,00	2344,00	3,10	16,60	16,70	4,50

Tabela 3. Resultados do estudo de Marshall para a percentagem ótima de betume

Percentagem de Betume [%]	BMT [kg/m <sup>3</sup> ]	Baridade Aparente [kg/m <sup>3</sup> ]	Volume de Vazios [%]	VMA [%]	Estabilidade [kN]	Deformação [mm]
5,10	2456,00	2362,00	3,80	15,40	19,70	3,50

Face aos resultados obtidos para a percentagem ótima de betume escolhida, é possível verificar que as condições impostas pelo caderno de encargos da EP para VMA é respeitada ( $VMA > 14\%$ ), bem como a deformação (que não pode ser superior a 4 mm).

## 4.2. Caracterização e desempenho das misturas recicladas

De modo a avaliar o desempenho das misturas com incorporação de 50% de material fresado, foram produzidas quatro misturas recicladas com diferentes aditivos rejuvenescedores. A mistura A foi produzida sem a adição de qualquer aditivo, apenas com 50% de MF, e as misturas B, C e D foram produzidas com incorporação de 50% de MF e 3% dos rejuvenescedores 1, 2 e 3, respetivamente. Durante o processo de compactação destas misturas verificou-se que as misturas com incorporação de aditivos mostraram uma maior trabalhabilidade, sendo que a mistura com incorporação do rejuvenescedor 1 foi a que mostrou maior facilidade de compactação.

### 4.2.1 Estudo de otimização das misturas recicladas

Adicionalmente ao estudo de formulação, e após escolhida a percentagem ótima de betume de 5,1% para a mistura reciclada com 50% de MF sem aditivo, procedeu-se à realização de um estudo de otimização, no qual foram realizados testes de sensibilidade à água e de deformação permanente a três misturas: uma com o teor ótimo de betume (5,1%) determinado pelo ensaio de Marshall, uma segunda mistura com um teor ótimo menos 0,5% de betume e a terceira com o teor ótimo mais 0,5% de betume. Para a produção das misturas com aditivos rejuvenescedores o teor ótimo de betume utilizado foi o mesmo obtido para a mistura sem aditivo (5,1%), e assim esta variável não influenciou a comparação dos resultados. O estudo de otimização (Tabela 4) foi efetuado para as quatro misturas em análise.

Tabela 4. Resultados do estudo de otimização das misturas recicladas

Percentagem de betume [%]	% Ótima - 0,5%				% Ótima				% Ótima + 0,5%			
Mistura	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
ITS <sub>d</sub> [kPa]	3895	3437	3627	3258	3874	3366	3575	2680	3833	2962	3625	2781
ITS <sub>w</sub> [kPa]	3739	3529	3588	3202	3796	3412	3487	2677	3829	3002	3591	2753
ITSR [%]	96,0	102,7	98,9	98,3	98,0	101,3	97,5	99,9	99,9	101,3	99,1	99,0
Taxa de deformação (WTS <sub>AIR</sub> ) [mm/10 <sup>3</sup> ciclos]	0,03	0,03	0,04	0,06	0,03	0,06	0,07	0,06	0,04	0,08	0,08	0,08

Legenda: Mistura A: Incorporação de 50% de MF, sem rejuvenescedor  
Mistura B: Incorporação de 50% de MF e 3% de rejuvenescedor 1  
Mistura C: Incorporação de 50% de MF e 3% de rejuvenescedor 2  
Mistura D: Incorporação de 50% de MF e 3% de rejuvenescedor 3

Embora os resultados obtidos para a percentagem ótima menos 0,5% de betume melhore no que diz respeito à resistência à deformação permanente, optou-se por manter a percentagem ótima igual a 5,1%, tendo em conta os resultados obtidos para ambos os ensaios realizados.

#### 4.2.2 Sensibilidade à água das misturas recicladas

Os estudos de sensibilidade à água são importantes para avaliar o comportamento da mistura em contacto com a água a longo prazo. A forma como a mistura é afetada pelo contacto com a água pode causar alguns problemas de durabilidade, incluindo a quebra da ligação entre o betume e o agregado, reduzindo assim a rigidez e a resistência da mistura betuminosa. Na Tabela 5 encontram-se os resultados deste estudo incluindo o valor de  $ITS_d$  para as quatro misturas recicladas descritas anteriormente (apenas para o teor ótimo de 5,1% de betume).

Tabela 5. Parâmetros da sensibilidade à água das misturas recicladas

Misturas	ITSR (%)	Volume de vazios (%)	$ITS_d$ (kPa)
50% RAP	98,0	3,2	3874
50% RAP + 3% Rej.1	101,3	2,9	3366
50% RAP + 3% Rej.2	97,5	2,3	3575
50% RAP + 3% Rej.3	99,9	2,9	2680

Na Figura 3 estão representados os resultados da relação entre o volume de vazios e a sensibilidade à água correspondente. Observando o valor de ITSR, principal indicador da sensibilidade das misturas à água, é possível concluir que as misturas recicladas com 3% dos rejuvenescedores 1 e 3 apresentam um desempenho ligeiramente melhor nesta propriedade.

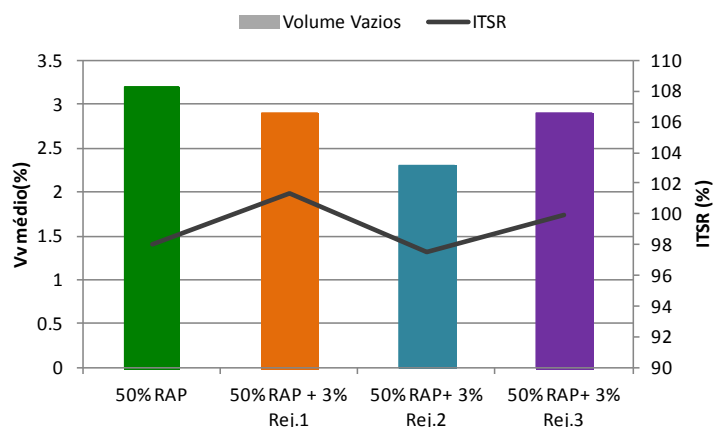


Figura 3. Efeito do volume de vazios e correspondente sensibilidade à água das misturas recicladas

#### 4.2.3 Resistência à deformação permanente das misturas recicladas

A resistência à deformação permanente é uma das propriedades mais importantes para garantir o bom desempenho das misturas betuminosas, particularmente em países onde se registam temperaturas mais elevadas. A Tabela 6 mostra os resultados obtidos no ensaio de deformação permanente para as quatro misturas betuminosas recicladas estudadas.

Tabela 6. Resultados do ensaio de deformação permanente das misturas recicladas

Propriedades	50% RAP	50% RAP + 3% Rej.1	50% RAP + 3% Rej.2	50% RAP + 3% Rej.3
Espessura média (mm)	41,6	41,1	41,8	40,9
Taxa de deformação ( $WTS_{AIR}$ ) (mm/ $10^3$ ciclos)	0,03	0,06	0,07	0,06
Profundidade máxima da rodeira ( $PRD_{AIR}$ ) (%)	4,7	6,8	6,2	7,0
Deformação máxima ( $RD_{AIR}$ ) (mm)	2,0	2,8	2,6	2,9



Os resultados obtidos mostram que não existe uma diferença significativa na resistência à deformação permanente das misturas com rejuvenescedores comparativamente à mistura sem qualquer aditivo. Verifica-se que as misturas com 3% dos rejuvenescedores 1 e 3 apresentam valores de deformação ligeiramente superiores. O gráfico da Figura 4 mostra a evolução da deformação das misturas de acordo com o número de ciclos, e nele é visível, tal como os valores da tabela indicam, que as misturas com adição dos rejuvenescedores 1 e 3 apresentam valores ligeiramente superiores de deformação, embora este aumento não seja significativo em comparação com os valores obtidos para as restantes misturas.

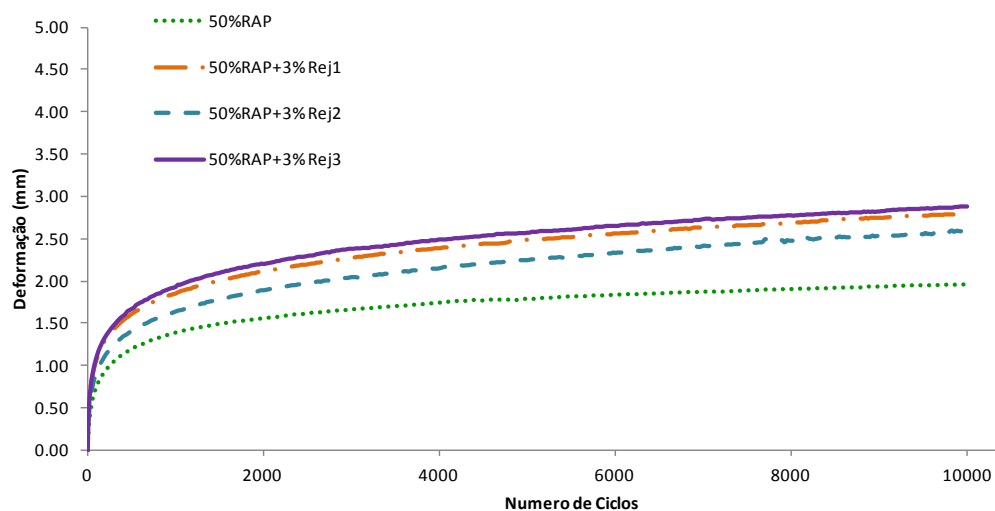


Figura 4. Resultados do ensaio de deformação permanente das misturas recicladas

#### 4.2.4 Módulo de rigidez das misturas recicladas

No que respeita aos módulos de rigidez e ângulos de fase das misturas recicladas foram construídas curvas mestras com as várias temperaturas ensaiadas, sendo a temperatura de referência de 20 °C (Figura 5 e Figura 6). Estas permitem comparar as misturas numa gama de frequências equivalente mais alargada. Nesta fase não foi possível estudar o aditivo 2.

Relativamente ao módulo complexo e ao ângulo de fase apresentados é possível verificar-se que o comportamento das misturas com rejuvenescedores é bastante semelhante. Verifica-se que a mistura reciclada sem qualquer aditivo apresenta um maior módulo e um menor ângulo de fase, o que implica um comportamento menos viscoso e mais elástico desta mistura.

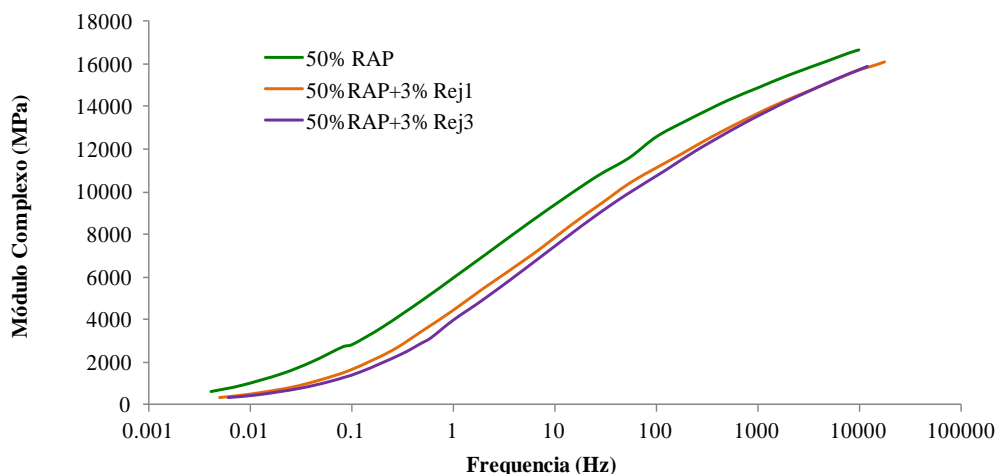


Figura 5. Curvas mestras do módulo complexo das misturas recicladas (temperatura de referência = 20 °C)

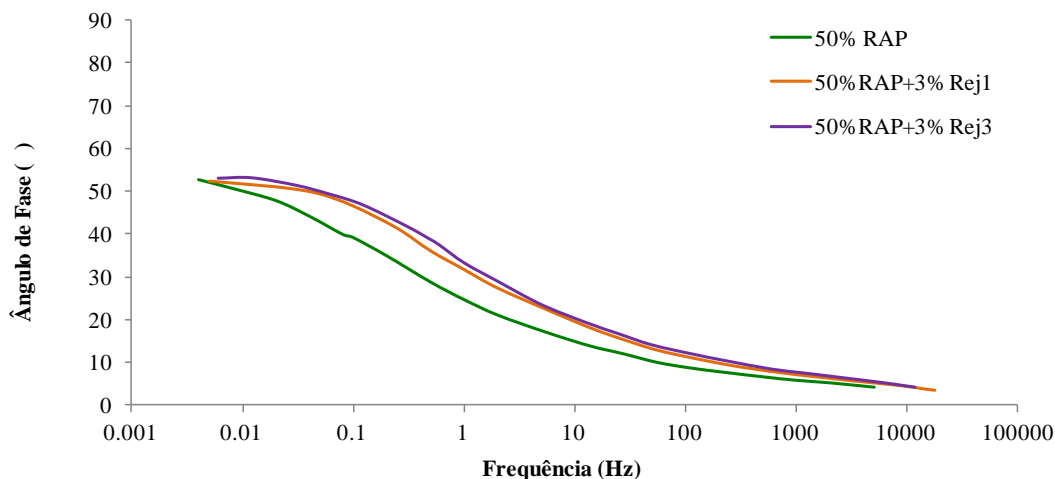


Figura 6. Curvas mestras do ângulo de fase das misturas recicladas (temperatura de referência = 20 °C)

A Tabela 8 indica os valores encontrados para o módulo complexo e o ângulo de fase para cada mistura em estudo a uma frequência de 8 Hz, a 20 °C, tal como é especificado na norma EN 13108-20. Verifica-se que a rigidez da mistura reciclada sem incorporação de rejuvenescedores é muito elevado, o que em princípio será prejudicial para a resistência ao fendilhamento desta mistura.

Tabela 7. Módulo de rigidez e ângulo de fase das misturas recicladas a 8 Hz

Propriedades	50% RAP	50% RAP+3% Rej1	50% RAP+3% Rej3
Módulo Complexo (MPa)	9021,5	7617,9	7067,6
Ângulo de Fase (°)	14,5	19,2	20,7

#### 4.2.5 Resistência à fadiga das misturas recicladas

No que respeita à resistência à fadiga das misturas em estudo, foram encontradas as leis representadas na Figura 7. Em seguida, a Tabela 8 apresenta os parâmetros mais importantes que podem ser obtidos a partir das leis de fadiga, a resistência ao fendilhamento por fadiga para uma extensão de tração de  $100 \times 10^{-6}$  (N<sub>100</sub>) e a extensão de tração que origina uma resistência ao fendilhamento por fadiga de  $1 \times 10^6$  ciclos ( $\epsilon_6$ ).

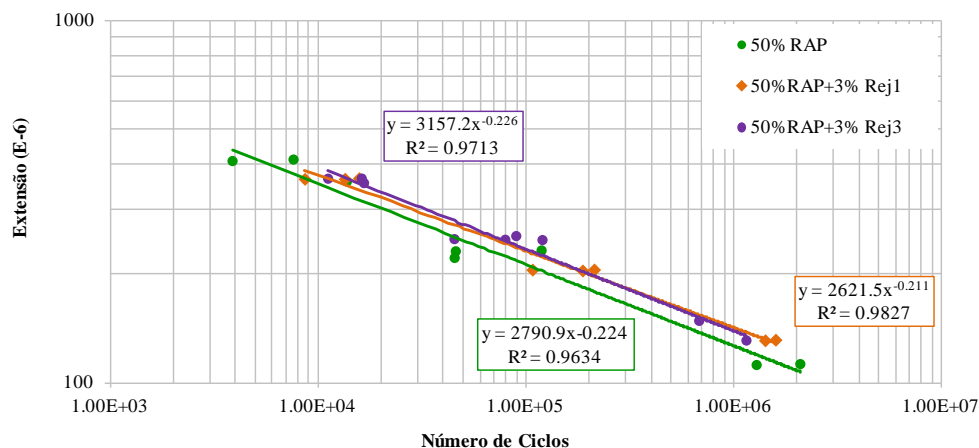


Figura 7. Leis de fadiga das misturas recicladas estudadas

Tabela 8. Parâmetros das leis de fadiga das misturas recicladas estudadas

Misturas	Parâmetros da lei de fadiga			$N_{100}$	$\varepsilon_6$
	a	b	$r^2$		
50% RAP	9,78E+14	4,299	0,963	2464089	123,3
50%RAP + 3% Rej1	9,93E+15	4,654	0,983	4890000	141,0
50%RAP + 3% Rej3	1,48E+15	4,295	0,971	3804149	136,5

Face aos resultados obtidos é possível concluir que as misturas recicladas com incorporação de rejuvenescedores apresentam melhor resistência à fadiga do que a mistura reciclada sem qualquer aditivo (com um aumento de 50% a 100% na vida à fadiga para uma extensão de tração de  $100 \times 10^{-6}$ ), não existindo no entanto diferenças significativas entre as duas misturas com rejuvenescedores.

## 5. CONCLUSÕES

O uso cada vez mais constante da tecnologia da reciclagem nos pavimentos é muito importante para se produzir misturas mais sustentáveis face às necessidades atuais de cada país. Os bons resultados até agora obtidos são motivadores relativamente ao desempenho esperado das misturas finais.

Face aos resultados obtidos é possível verificar que as misturas com os três rejuvenescedores estudados apresentam um comportamento muito semelhante. No que respeita à sensibilidade à água e à deformação permanente é muito interessante o facto de os resultados da mistura com um óleo vegetal serem muito semelhantes aos resultados da mistura com um aditivo comercial. Já no que respeita ao módulo das misturas e à análise à fadiga, e uma vez que apenas foi possível o estudo de dois dos rejuvenescedores, pode-se concluir que as misturas com estes dois aditivos apresentam um comportamento muito semelhante entre elas, mas superior à mistura reciclada sem aditivos.

No geral pode admitir-se que as misturas com incorporação de aditivos rejuvenescedores apresentam um melhor comportamento quando comparadas com a mistura reciclada sem qualquer aditivo, pelo que se justifica o seu uso em misturas recicladas com elevada quantidade de material fresado.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado por Fundos FEDER através do QREN e do Programa Operacional Fatores de Competitividade - COMPETE, projeto n.7603 SI Inovação e por Fundos Nacionais através da FCT - Fundação para a Ciência e a Tecnologia no âmbito do projeto estratégico UI 4047 - 2011-2012 do Centro do Território Ambiente e Construção.

## REFERÊNCIAS

- Abreu, L.P.F., Oliveira, J.R.M., Silva, H.M.R.D., Palha, D., Fonseca, P., Gomes, V., Pereira, P. Estudo do comportamento de betumes envelhecidos modificados com rejuvenescedores, XVII Congresso Ibero-Latinoamericano Del Asfalto – CILA – Guatemala. 2013.
- Baptista, A.M.C. Misturas Betuminosas Recicladas a Quente em Central - Contribuição para o seu estudo e aplicação, Universidade de Coimbra, Coimbra. 2006.

- Boyer, RE., Asphalt rejuvenators: “fact, or fable”. In: Transportation systems (TS2K) workshop, San Antonio, Texas. 2012.
- Brownridge, J. The Role of an Asphalt Rejuvenator in Pavement Preservation: Use and Need for Asphalt Rejuvenation. Compendium of Papers, the First International Conference on Pavement Preservation, Newport Beach, CA, April 13–15. 2010.
- Castro, L. N. Reciclagem a Frio “in situ” com Espuma de Asfalto. Tese de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil. 2003.
- Colbert, B., You, Z., The determination of mechanical performance of laboratory produced hot mix asphalt mixtures using controlled RAP and virgin aggregate size fractions, *Construction and Building Materials*, 26. pp. 655-662. 2012.
- Dinis-Almeida, M, Castro-Gomes, J, Antunes, ML. Mix design considerations for warm mix recycled asphalt with bitumen emulsion. *Construction and Building Materials*. 28(1). p.687-693. 2012.
- Fonseca, P., Guimarães, C., Gomes, V., Palha, D., Silva, H.M.R.D., Oliveira, J.R.M., Abreu, L.P.F. Estudo de Material Fresado para Incorporação em Misturas Betuminosas a Quente com Altas Taxas de Reciclagem, 7º Congresso Rodoviário Português, Lisboa. 2013.
- Kerkhof, EV. Warm waste asphalt recycling in Belgium - 30 years of experience and full confidence in the future. 5th Eurasphalt & Eurobitume Congress, Istanbul. 13-15 June. 2012.
- Oliveira, J.R.M., Silva, H.M.R.D., Abreu, L.P.F., Pereira, P.A.A., Effect of Different Production Conditions on the Quality of Hot Recycled Asphalt Mixtures, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 53. pp. 266-275. 2012.
- Shu, X., Huang, B., Shrum, E.D., Jia, X. Laboratory evaluation of moisture susceptibility of foamed warm mix asphalt containing high percentages of RAP, *Construction and Building Materials*, 35. pp. 38-48. 2012.
- Silva, H.M.R.D., Oliveira, J.R.M., Jesus, C.M.G., Are totally recycled hot mix asphalts a sustainable alternative for road paving?, *Resources, Conservation and Recycling*, 60. pp. 38-48. 2012.
- Silva, H.M.R.D., Oliveira, J.R.M., Peralta, J., Zoorob, S.E., Optimization of warm mix asphalt using different blends of binders and synthetic paraffin wax contents, *Construction and Building Materials*, 24. pp. 1621-1631. 2010.